

## ПРИМЕНЕНИЕ ГРАФИТА В ЭЛЕКТРОИСКРОВЫХ ТЕХНОЛОГИЯХ

*Институт прикладной физики АНМ,  
ул. Академией, 5, г. Кишинёв, MD- 2028, Республика Молдова, [mihalek@yandex.ru](mailto:mihalek@yandex.ru)*

В настоящей работе рассмотрены возможности использования графита как электродного материала для электроискрового легирования (ЭИЛ) для улучшения различных физико-механических свойств поверхностей деталей различного назначения.

Выбор графита в качестве электродного материала обоснован рядом его достоинств. Известно, что графит в свободном состоянии является прекрасным твердосмазочным материалом, а в связанном, в виде карбидов, – твердой износостойкой фазой, довольно устойчивой ко многим агрессивным средам. В ряде случаев требуется одновременное сочетание этих свойств графита. Однако сложность выполнения таких требований заключается в том, что формирование по  $V=10^4-10^5$  град/сек, образующихся при каждом единичном импульсе ЭИЛ [1]. Такая высокая скорость охлаждения приводит к формированию фазового состава по метастабильной диаграмме с образованием карбидов и других метастабильных фаз. Графит в свободном виде в этом случае не выделяется.

В настоящей работе рассматриваются некоторые способы получения в поверхностном слое детали свободного графита методом ЭИЛ и его использование для повышения эксплуатационных характеристик деталей из стали, титановых и медных сплавов.

### **Методика проведения исследований**

Исходными материалами служили сталь 40X и титановый сплав ВТ20, широко используемые для изготовления деталей узлов трения. Изготовленные из этих материалов образцы для рентгенофазовых и металлографических исследований, а также ролики для испытаний на изнашивание подвергали электроискровой обработке на установке «Элитрон-22» при энергиях разряда  $W_{и} = 0,1-0,72$  Дж. Время обработки  $1 \text{ см}^2$  легируемой поверхности составляло 1–2 мин.

Для получения свободного графита в поверхностном слое образцов были применены новые технологические способы ЭИЛ, основанные на влиянии различных легирующих добавок на выделение из железоуглеродистых расплавов несвязанного графита.

Первый способ представляет собой легирование поверхностных слоев железоуглеродистых сплавов графитизирующими материалами: ферросилицием, силикокальцием, алюминием. Эти вещества, введенные в микрорасплав, образуют с углеродом соединения, которые служат центрами кристаллизации графита и препятствуют образованию карбидов. Кроме этого, они способствуют измельчению графитовых включений и тем самым повышают прочность формируемого слоя. Второй прием основан на уменьшении растворимости графита в сплавах на основе железа и титана при введении в расплав таких элементов, как медь, олово, серебро, значительно снижающих межфазную активность [2], что препятствует образованию карбидов. При этом, учитывая высокую скорость охлаждения и кристаллизации микрорасплавов при ЭИЛ, можно сохранить графит в нерастворенном состоянии и воспрепятствовать образованию карбидов. Для осуществления этих способов использовали как электроды, так и порошки, вводимые в поверхностный слой образцов контактно-порошковым методом.

Электроискровую обработку титанового сплава и стали проводили двумя способами: традиционным с помощью графитового электрода и контактно-порошковым [3] с использованием компактных электродов и порошков (табл. 1 и 2).

С целью получения одинаковой шероховатости поверхностей роликов, обработанных по разным режимам ЭИЛ, их подвергали последующей поверхностно-пластической деформации (ППД) путем обкатки стальным шариком диаметром 16 мм под нагрузкой  $P_{ППД}$ . Для образцов из стали 40X  $P_{ППД} = 700$  Н, а из сплава ВТ20  $P_{ППД} = 400$  Н.

Таблица 1. Режимы обработки и результаты испытаний на изнашивание образцов из стали 40X после электроискрового легирования

Образец	Материал электрода		$W_{и}$ , Дж	$K_{тр}$	$\Delta t \cdot 10^6$ , кг
	компактного	порошкового			
1 (без покрытия)	-	-	-	0,04	3,9
2	Графит МПГ-6	-	0,43	0,04	3,2
3	Медь М1-0	Графит ЛГ-2+ +Ферросилиций ФС-75	0,36	0,03	2,6
4	Медь М1-0	-	0,43	0,02	2,1
5	Модификатор ЖКМК-3Р	Графит ЛГ-2+ +медь М1-0	0,43	0,02	0,5

Обозначения:  $W_{и}$  – энергия разряда;  $K_{тр}$  – коэффициент трения;  $\Delta t$  – износ.

Примечания. 1. ЖКМК-3Р – модификатор на основе кремния, содержащий 0,49% Si, 10,1% Ca, 10% Mg, 10% PЗМ, остальное – Fe. 2. Испытания на износ проводили в условиях граничного трения.

Испытание на изнашивание осуществляли на машине трения модели СМТ-1 по схеме ролик-колодка при сухом и граничном трении. Последнее осуществлялось при подаче в зону трения индустриального масла И-20 со скоростью 2–3 капли в минуту. Нагрузка на пару трения при граничном трении равнялась 7 МПа, при сухом трении – 3 МПа. Площадь фактического контакта составляла 1 см<sup>2</sup> при линейной скорости скольжения 1,3 м/с и пути трения при каждом испытании 14,04 · 10<sup>4</sup> м. После периода приработки и испытаний ролик и колодку взвешивали на аналитических весах АДВ-200. Ошибка измерения ±0,0005 г. При испытании стальных роликов колодки изготовляли из серого чугуна СЧ21, титановых – из закаленной стали 45. Титановые образцы подвергали испытаниям в условиях как граничного, так и сухого трения скольжения. Сравнивали износостойкость поверхностных слоев, содержащих только карбидную фазу, а также композицию из карбидов и графита.

Режимы обработки и результаты испытаний на изнашивание образцов из стали 40X приведены в табл. 1, титановых образцов – в табл. 2. Рентгенофазовый анализ осуществляли на дифрактометре «ДРОН-3». Съёмку стальных образцов проводили в кобальтовом  $K_{\alpha}$ -излучении, а титановых – в медном  $K_{\alpha}$ -излучении.

Таблица 2. Режимы обработки и результаты испытаний на изнашивание образцов из стали титанового сплава ВТ-20 после электроискрового легирования

Образец	Материал электрода		$W_{и}$ , Дж	$K_{тр}$	$\Delta t \cdot 10^6$ , кг
	компактного	порошкового			
1	Графит ЭГ-2	-	0,32	0,057 / 0,05	2,6 / 0,4
2	- " -	-	0,36	0,036 / 0,05	0,86 / 0,2
3	- " -	-	0,43	0,032 / 0,05	1,27 / 0,7
4	- " -	-	0,58	0,038 / 0,05	2,0 / 1,46
5	Графит ЭГ-2	Графит ЛГ-2 + +медь М1-0	0,32	0,021 / 0,05	0,51 / 6,2
6	- " -	- " -	0,36	0,020 / 0,05	0,43 / 6,4
7	- " -	- " -	0,43	0,022 / 0,05	0,54 / 6,1
8	- " -	- " -	0,58	0,022 / 0,05	0,56 / 6,5

Примечание: В числителе даны результаты испытаний на изнашивание в условиях граничного трения, в знаменателе – сухого трения.

В качестве электродных материалов для ЭИЛ образцов из меди использовались алюминий марки А95 и графит марки МПГ6. Рентгенофазовый анализ осуществлялся на установке «ДРОН-2». Испытание покрытий на износ проводили при граничном трении по схеме ролик-колодка с нагрузкой 400 Н/см<sup>2</sup> и сухом трении с нагрузкой 300 Н/см<sup>2</sup>. Ролики были изготовлены из меди М-1, колодка – из закаленной стали 45.

Исследование коррозионной стойкости электроискровых покрытий осуществляли в трех средах: а) в 5%-ном растворе NaCl, имитирующем морскую среду; б) в 0,05М растворе Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> – промышленная среда; в) 20 %-ный раствор H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> – кислая среда.

Оценку коррозионных разрушений проводили по изменению внешнего вида (ГОСТ 9.076–77), гравиметрическому определению скорости коррозии (ГОСТ 17332-71), атомно-абсорбционной спектроскопии коррозионных сред и рентгенофазовому анализу исследуемого покрытия как до, так и после проведения коррозионных испытаний.

#### Результаты исследований и их обсуждение

Ранее нами было показано [4], что при проведении ЭИЛ с использованием графитового электрода в поверхностном слое образцов из технического железа образуются карбиды; свободного графита практически нет. В случае введения графита в зону ЭИЛ в виде порошка совместно с модифицирующими добавками в поверхностном слое образуется значительное количество свободного графита. При оптимальных условиях его содержание достигает 10–20% в слое толщиной 15 мкм. Это должно создавать благоприятные условия для длительного присутствия графита (как твердой смазки) на поверхности трения образцов.

Рентгенофазовый анализ показал, что зависимость соотношения фаз в покрытиях на стали 40Х от материалов электродов и режимов ЭИЛ такая же, как при обработке чистого железа. Установлено, что хром, содержащийся в стали 40Х в количестве до 1,1%, практически не влияет на процесс графитизации поверхностного слоя образцов.

Методики получения свободного графита в поверхностном слое титановых сплавов и материалов на основе железа аналогичны. Однако для титана кремний в качестве модификатора неприемлем, так как практически в нем не растворяется. Использование меди в качестве модификатора дало положительные результаты. После ЭИЛ контактно-порошковым методом, при котором использовались графитовый электрод и порошковая мелкодисперсная смесь графита и меди, в поверхностном слое образцов из сплава ВТ20 наблюдалось наиболее высокое содержание свободного графита. Оценка интенсивности линий графита на дифрактограммах показала (рис. 1), что его наибольшее количество (массовая доля ~ 16%) образуется после ЭИЛ при  $W_{и} = 0,43$  Дж. При ЭИЛ по этому режиму формируется и наибольшее количество карбида титана. При обработке титановых образцов только компактными графитовыми электродами при всех режимах ЭИЛ в поверхностном слое образуются в основном карбид титана TiC и незначительное количество свободного графита (рис. 1). Количество карбида TiC с увеличением энергии разряда растет, а при  $W_{и} = 0,43$  Дж стабилизируется. Свободный титан в поверхностном слое отсутствует, а если и есть, то в незначительном количестве, его линии на дифрактограммах находятся на уровне фона.

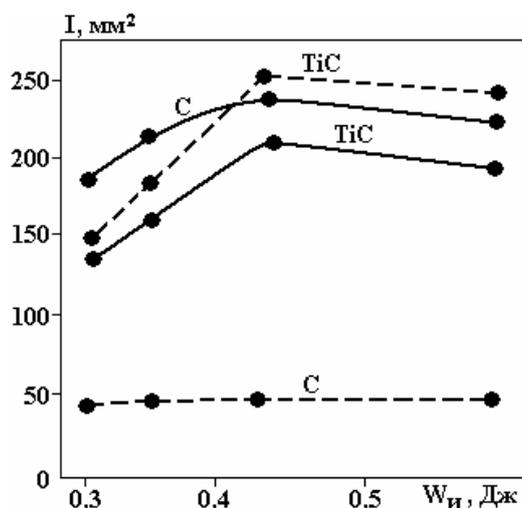


Рис. 1. Зависимость интенсивности линий графита и карбида титана TiC от энергии разряда при электроискровом легировании сплава ВТ20 контактно-порошковым методом (сплошные линии) и контактным методом (штриховые линии)

Оценивая результаты рентгеноструктурного анализа (табл. 3), можно отметить, что наибольшая плотность дефектов ( $\beta$ ) сформировалась при рабочем токе обработки, равном 1,76 А, то есть при  $W_{и} = 0,36$  Дж, при которой формируется и наиболее благоприятная с позиции износостойкости субструктура [7].

Расчет макронапряжений поверхностного слоя после ЭИЛ показал, что во всех случаях сформировались сжимающие напряжения (табл. 3), что положительно влияет на прочностные характеристики покрытия.

Таблица 3. Значение физического уширения  $\beta_{220}$  и величины макронапряжений  $\varepsilon_1 + \varepsilon_2$  по HKL220

№ обр.	Материал электрода	Энергия разряда $W_{и}$ , Дж	$\beta_{220}$ , град.	$\varepsilon_1 + \varepsilon_2$ , кг/мм <sup>2</sup>
1	ЭГ-2 (компактн.)	0,32	0,14	- 156 ± 25
2	- " -	0,36	0,18	- 176 ± 25
3	- " -	0,43	0,16	- 161 ± 25
4	- " -	0,58	0,11	- 156 ± 25
5	ЭГ-2 + порошок графита ЛГ-2 и меди М1-0	0,36	0,17	- 146 ± 25

Испытания на изнашивание образцов из стали 40X проводили после ЭИЛ с  $W_{и} = 0,43$  Дж, при котором в поверхностном слое чистого железа формируются наибольшее количество свободного графита и оптимальная с позиций износостойкости субструктура [4, 5]. Можно считать, что и для стали 40X этот режим будет близким к оптимальному.

Установлено (см. табл. 1), что после ЭИЛ износостойкость стальных образцов возрастает, при этом формирование свободного графита в поверхностном слое способствует более существенному повышению износостойкости и снижению коэффициента трения, чем при образовании одних только карбидов. Наиболее высокие результаты получены при ЭИЛ модификатором ЖКМК-3Р совместно с порошком графита и меди (образец 5).

Показано (табл. 2), что при испытаниях на изнашивание титановых роликов без электроискровых покрытий происходят их схватывание и задиры еще на стадии приработки. Наиболее высокая износостойкость при граничном трении наблюдалась при сочетании карбидной и графитовой фаз в поверхностном слое образцов. В случае сухого трения графитовая фаза, наоборот, ухудшает износостойкость, что можно объяснить утратой смазочной способности графита при таких условиях [6]. Результаты испытаний показали (табл. 2), что наиболее высокая износостойкость наблюдается при ЭИЛ с энергией разрядов 0,36 Дж, для которой характерны оптимальные с позиций износостойкости параметры субструктуры формирующегося слоя [7].

Таким образом, был разработан способ формирования существенного количества свободного графита в тонком поверхностном слое (10–20 мкм) деталей из сталей и титановых сплавов методом ЭИЛ, отличающийся тем, что это формирование осуществляется контактно-порошковым методом, когда в зону обработки дополнительно подается порошковая смесь из графита и модификаторов. При этом содержание свободного графита достигало в сталях 10–20% мас. И в титане – до 16% масс. Износостойкость при испытаниях в условиях граничного трения образцов из стали 40X и титанового сплава ВТ-20 по разработанному методу повысилась по сравнению с необработанными в 7–8 раз. В случае сухого трения свободный графит в поверхностном слое титана ухудшает износостойкость. Формирование же карбидной сетки TiC предотвращает схватывание пары трения и повышает износостойкость. При этом максимальные результаты получились при  $W_{и} = 0,36$  Дж.

Использование процесса ЭИЛ для повышения износостойкости поверхностей трения часто ведет к ухудшению шероховатости, которая согласно практическим данным, в зависимости от условий трения, должна быть в пределах  $Ra = 3 \div 0,32$  мкм [8]. При этом существует ряд деталей, поверхности трения которых из-за конструктивных особенностей не всегда возможно довести до требуемой шероховатости апробированными методами: ППД, шлифованием и т.п.

В связи с этим исследовали возможности ЭИЛ графитом для уменьшения шероховатости поверхностей, сформированных предварительной электроискровой обработкой другими электродными материалами. Использование графитовых электродов для этих целей обосновывалось их очень большим электрическим сопротивлением, на 2–3 порядка большим, чем у многих металлов, и в связи с этим их быстрым разогревом в процессе ЭИЛ и сохранением в твердом состоянии до 4000°C (которая выше температуры плавления любого металла). Это должно вести к оплавлению гребешков шероховатости и формированию более плавного рельефа. Для исследования были выбраны материалы первичных электродов: медь и серебро (как представители металлов, не растворяющих в себе углерод и не образующих с ним карбиды), никель и титан (представители металлов, образующих с углеродом прочные химические соединения).

Материалом подложки (катода) служили образцы из стали 45 нормализованной. ЭИЛ осуществляли на установке «Электрон-22» в диапазоне энергий разряда 0,2–0,4 Дж и при удельном времени обработки 1 см<sup>2</sup>/мин. Шероховатость электроискровых покрытий определялась на профилографе – профилометре мод. 252.

Полученные результаты ЭИЛ первичными электродами (рис. 2, кривые 1, 3, 5, 7) показали, что по мере возрастания шероховатости покрытий материалы электродов расположились в следующей последовательности: Cu, Ti, Ag, Ni. После последующей ЭИЛ покрытий графитом ряд шероховатостей по мере возрастания несколько изменился: Cu, Ag, Ti, Ni (рис. 2, кривые 2, 4, 6, 8). Такой результат можно объяснить тем, что при обработке Ti и Ni образуются тугоплавкие карбиды, которые в меньшей степени, чем сплавы и растворы (Cu, Ag), поддаются эрозии и сглаживанию шероховатой поверхности.

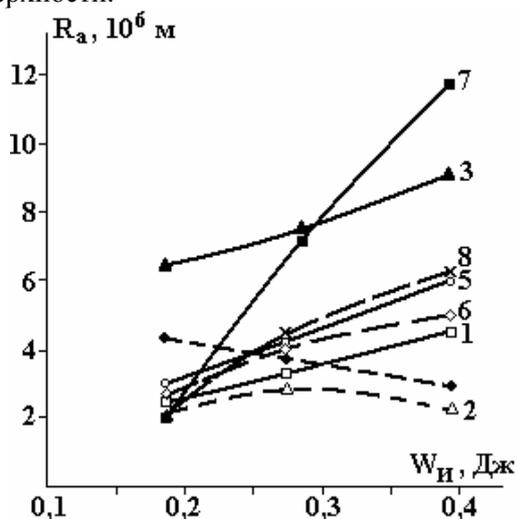


Рис. 2. Зависимость шероховатости поверхности после ЭИЛ чистыми металлами и последующей графитизацией. Материал анода: 1 – Cu; 2 – Cu + графит; 3 – Ag; 4 – Ag + графит; 5 – Ti; 6 – Ti + графит; 7 – никель; 8 – Ni + графит. Катод – сталь 45

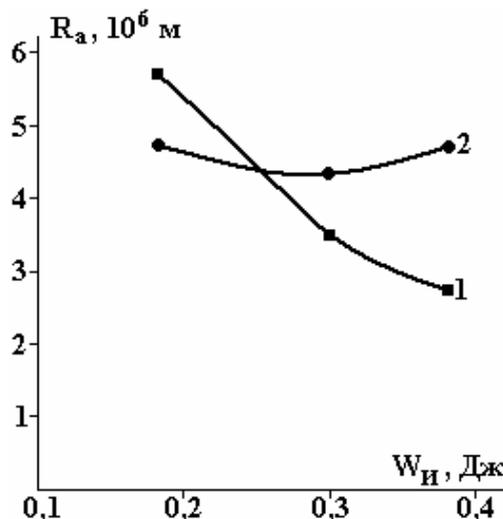


Рис. 3. Зависимость шероховатости поверхности электроискрового покрытия (1) серебром и (2) титаном от энергии разряда при последующем ЭИЛ графитом. Предварительное ЭИЛ Ag (1) и Ti (2) при  $W_u - const = 0,24$  Дж

Благодаря такому обоснованию понятны и результаты другого эксперимента, в котором была постоянной энергия разрядов при ЭИЛ первичными электродами из Ag и Ti и изменялась энергия при ЭИЛ графитом. В этом случае шероховатость покрытия титаном с увеличением энергии растет (рис. 3), а при ЭИЛ серебром падает, во всех случаях оставаясь ниже, чем при ЭИЛ одними электродами из Ag и Ti.

Таким образом, результаты исследований показали возможность улучшить шероховатость электроискровых покрытий при последующей их обработке ЭИЛ графитовым электродом и тем самым в ряде случаев формировать рельеф поверхности, пригодный с точки зрения трибологии [8]. Кроме того, показано, что наиболее эффективное влияние на шероховатость покрытий оказывает ЭИЛ графитом, если предварительная обработка осуществлялась электродами из металлов, не образующих химических соединений с углеродом.

Материалы на основе меди, благодаря высокой пластичности, электропроводности, антифрикционным свойствам, нашли широкое применение для изготовления деталей, работающих в парах трения, как в электротехнике, так и в машиностроении в узлах трения машин и механизмов. Однако в ряде случаев медь должна обладать также и коррозионной стойкостью в различных агрессивных средах, таких как промышленная атмосфера, морская, кислая среда и т.п. Сочетания же многих этих свойств можно добиться некоторыми методами поверхностной обработки, среди которых наиболее эффективным и простым является метод электроискрового легирования, сочетающий в себе процессы поверхностного легирования и термопластического упрочнения.

В связи с тем, что медь и однородные медные сплавы не поддаются существенному упрочнению под воздействием только деформационных факторов (максимальная плотность дислокаций после термопластического эффекта при ЭИЛ или ППД не превышала плотность дислокации  $10^{14}$  м<sup>-2</sup> [7], что далеко до предельного упрочнения, характеризуемого  $\rho = 10^{15-16}$  м<sup>-2</sup> [9]), был выбран путь формирования вторичных упрочняющих фаз методом ЭИЛ. В этом случае повышение прочности осуществлялось за счет упругого взаимодействия между движущимися дислокациями и локальными искажениями

ми, вызванными этими вторичными фазами, уменьшением энергии дефектов упаковки ( $\gamma$ ) сформированного слоя, что способствовало подавлению динамического возврата при термопластической деформации, сопровождающей ЭИЛ.

Поэтому в качестве материала электрода, образующего при ЭИЛ вторичные фазы, был выбран алюминий. С одной стороны, этот металл образует с медью ряд интерметаллидов, способствующих повышению износостойкости и коррозионной стойкости меди [10]. С другой стороны, у меди и алюминия близкие коэффициенты электропроводности, что существенно для деталей электротехнической промышленности. Для уменьшения шероховатости и коэффициента трения поверхностного слоя, образуемого алюминиевым электродом, последующее ЭИЛ проводили графитом.

Задачами проведенной работы являлись исследование и определение фазового состава и структуры поверхностного слоя медных деталей, обеспечивающих их повышенную износ- и коррозионную стойкость в ряде химических сред.

Результаты рентгенофазовых исследований показали, что при всех режимах ЭИЛ после обработки алюминиевым электродом в поверхностном слое, кроме меди, обнаруживаются в основном фазы  $\text{CuAl}_2$ ,  $\text{Cu}_{0,6}\text{Al}_{0,4}$  [11].

После последующего ЭИЛ графитом в пограничном слое образуется еще и существенное количество свободного графита и незначительное карбида алюминия  $\text{Al}_4\text{C}_3$  [11]. Сформированная многофазная структура обеспечила повышение микротвердости упрочненного слоя. Если микротвердость необработанной меди была только лишь  $H_m = 790$  МПа, то после ЭИЛ алюминиевым электродом микротвердость  $H_m = 6000$  МПа. Однако шероховатость поверхности медных образцов после этого ухудшилась, достигнув  $R_a = 5,8 \cdot 10^{-6}$  м, что нежелательно для условий трения. После же последующего ЭИЛ графитовым электродом шероховатость поверхности существенно уменьшилась и составила  $R_a = 2,4 \cdot 10^{-6}$  м, что вполне приемлемо для многих пар трения. Микротвердость тоже несколько понизилась, достигнув величины  $H_m = 5000$  МПа, которая также заметно выше первоначальной микротвердости меди.

Испытания сформированных покрытий на износ показали (табл. 4), что при граничном трении наибольшей износостойкостью обладало комплексное покрытие, полученное последовательной обработкой алюминиевым и графитовым электродами. При сухом трении лучшую износостойкость показало покрытие, сформированное лишь алюминиевым электродом.

Результаты коррозионных испытаний в виде кинетических кривых представляют собой зависимость парциальной скорости растворения Cu и Al из поверхностного слоя исследуемых покрытий в агрессивных средах от продолжительности этих испытаний [11]. Анализ результатов показал, что при испытаниях в 0,05М растворе  $\text{Na}_2\text{SO}_4$ , соответствующем промышленной среде, при ЭИЛ алюминиевым и графитовым электродами медь не переходит в коррозионную среду в течение всей продолжительности испытаний. Эффективность защиты Cu в 0,05М растворе  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  достигает 100%. Парциальная скорость растворения Al из поверхностного слоя меди, легированной Al, возрастает с увеличением продолжительности испытаний, в случае же последующего легирования графитом растворение алюминия снижается до полного его прекращения.

Таблица 4. Режимы ЭИЛ и результаты испытаний на износ электронных покрытий на меди М-1

№ образца	Материал электрода	Энергия разряда ЭИЛ $W_{и}$ , Дж	Удельн. время ЭИЛ $\tau \cdot 10^5$ , с/м <sup>2</sup>	Микротвердость покрытия $H_m$ , МПа	Граничное трение		Сухое трение
					коэффиц. трения	износ ролика $\Delta m$ , $10^{-6}$ кг	износ ролика $\Delta m$ , $10^{-6}$ кг
1	Медь М-1	0,585	1	2500	0,06	69,4	5,2
2	Графит ЭГ-2	0,585	1	3500	0,03	1,1	1,6
3	Алюминий А95	0,3	1	6000	0,04	2,1	-
4	Алюминий А95	0,5	1	-	0,04	0,8	0,9
5	Алюминий А95	0,585	1	-	0,04	1,0	-
6	А95 + +Графит ЭГ-2	0,5+0,585	1+1	5000	0,03	0,2	-

Коррозионные испытания в 5%-ном растворе NaCl (имитировавшем морскую среду) показали [11], что присутствие в поверхностном слое медных деталей легирующих добавок Al или (Al + графит) приводит к значительному снижению скорости растворения в этой среде примерно на порядок – при всей продолжительности (120 часов) коррозионных испытаний.

Коррозионное разрушение поверхностного слоя меди начинается с растворения Al и фаз, в которые входит Al:  $\text{CuAl}_2$ ,  $\text{Cu}_{0,6}\text{Al}_{0,4}$ ,  $\text{Al}_4\text{C}_3$ . После растворения этих фаз в поверхностном слое остаются лишь Cu, C,  $\text{Cu}_2\text{O}$ .

Коррозионные испытания в 20%-ном растворе  $\text{H}_2\text{SO}_4$  (имитирующем кислую среду) показали [11], что на начальной стадии испытаний (8 часов) легирование Al и Al+C существенно снижает скорость растворения меди, примерно в 400 раз. Однако со временем ЭИЛ алюминием снижает скорость коррозии меди в 20 раз (при  $\tau = 24$  часа) и в 2 раза (при  $\tau = 120$  часов). ЭИЛ же меди алюминием и графитом приводит со временем к увеличению скорости растворения меди (что связано, по-видимому, с присутствием в поверхностном слое фаз  $\text{Al}_4\text{C}_3$  и графита) и неэффективности применения такого покрытия на медных деталях, предназначенных для работы в кислых средах.

Сравнительно новая область использования графита в качестве электродного материала ЭИЛ – это формирование с его помощью малорастворимого поверхностного слоя на анодах катодного метода защиты подземных металлических коммуникаций от коррозии [12]. Актуальность создания малорастворимых анодов обусловлена тем, что при широком внедрении станций катодной защиты они имеют ограниченный срок службы в основном из-за сравнительно высокой скорости растворения анодов в результате электрохимического процесса между анодом и защищаемыми коммуникациями.

В результате проведенных исследований был предложен способ, основанный на формировании методом ЭИЛ малорастворимого поверхностного слоя анода в виде гетерогенной смеси титано-никелевых интерметаллидов, графита и карбидов. Формирование в поверхностном слое анодов титано-никелевых интерметаллидов обеспечило прохождение электрических процессов в основном за счет выделения газов (кислорода) из воды и растворов, присутствующих в почве, а не за счет собственного растворения [13]. Введение дополнительных фаз графита и карбидов обеспечило формирование ультрадисперсной структуры, представляющей собой квазиравновесную систему, поверхностная энергия которой близка к нулю, что обеспечивает еще более высокую коррозионную стойкость анода и более низкое поверхностное сопротивление. Коррозионные испытания, проведенные в ячейке с землей (pH = 7,5–7,85) при 25°C и относительной влажности 40–50%, плотности анодного тока 10  $\text{mA}/\text{cm}^2$ , в течение 5 часов, показали (табл. 5), что наиболее высокая коррозионная стойкость и низкое сопротивление между анодом и катодом наблюдались у анода с электроискровым покрытием из смеси титано-никелевых интерметаллидов, карбидов и графита. При этом скорость коррозии уменьшилась по сравнению со стальным анодом на два порядка, а электросопротивление – в 3 раза.

Таблица 5. Сравнительные характеристики анодных материалов

№ образца	Материал анода	Ток, mA	Напряжение, V	Плотность тока, $\text{mA}/\text{cm}^2$	Коррозионные потери анода, $\text{kg}/\text{m}^2$ в год	Сопротивление между анодом и катодом, $10^{-2}$ Ом
1	Сталь 10	60	10,5	10	711,6	1,6
2	Титан	45	17	10	438	4
3	$\text{Ti}_2\text{Ni}$	45	22	10	50,55	5
4	$\text{Ti}_2\text{Ni} + \text{C}$	40	4	10	4,6	1

### Заклучение

Полученные результаты представили широкий диапазон возможностей графита в формировании различных физико-механических свойств поверхностей деталей методом ЭИЛ.

1. Определены условия получения свободного графита повышенного процентного содержания в поверхностных слоях деталей из стали и титана. Установлено, что износостойкость таких покрытий на стали и титане повышается при граничном трении в 7–8 раз.

2. Электроискровая обработка графитом предварительно обработанных поверхностей этим же методом, но другими материалами позволяет уменьшить шероховатость покрытий в 1,5–3 раза.

3. Формирование в поверхностном слое меди интерметаллидных медно-алюминиевых фаз в сочетании со свободным графитом и карбидами дало значительное повышение коррозионной стойко-

сти меди в промышленной и морской среде, а также повышение износостойкости при сухом трении почти на порядок, а при граничном трении – на два порядка.

4. Формирование в поверхностном слое анода катодной защиты титано-никелевых интерметаллидов в сочетании с фазами графита и карбидов повышает его коррозионную стойкость в грунтах по сравнению со стальными анодами на два порядка.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Гитлевич А.Е., Михайлов В.В., Парканский Н.Я., Ревуцкий В.М. Электроискровое легирование металлических поверхностей. Кишинев: Штинца, 1985, 196 с.
2. Фёдоров В.Б., Шоршоров М.Х., Хакимова Д.К. Углерод и его взаимодействие с металлами. М.: Металлургия, 1978, 142 с.
3. А.с. 113 403 СССР Способ нанесения покрытий и устройство для его осуществления /Бюллетень изобретений и открытий, 1985, №15.
4. Михайлюк А.И., Гитлевич А.Е., Иванов А.Н. и др. Превращение в поверхностных слоях сплавов железа при электроискровом легировании графитом // Электронная обработка материалов. 1986. № 4. С. 23–27.
5. Михайлюк А.И., Гитлевич А.Е., Рапопорт Л.С. Влияние режимов электроискрового легирования на структуру и износостойкость железа // Электронная обработка материалов. 1988. № 4. С. 10–13.
6. Васильев Ю.Н. Природа смазочной способности графита // Трение и износ. 1983. Т. IV. № 3. С. 483–492.
7. Михайлюк А.И. Влияние электроискрового легирования металлических поверхностей на их износостойкость. Автореферат дисс.канд.техн.наук. Москва, 1990, 16 с.
8. Костецкий Б.И. Трение, смазка и износ в машинах. Киев: Техника, 1970. 395 с.
9. Гиндин Н.А., Аксенов Б.К. К вопросу о зависимости прочности при растяжении от количества дефектов кристаллической структуры // ФММ. 1997. Т. 44. Вып. 4. С. 864–871.
10. Вол А.Е. Строение и свойства двойных металлических систем. Т.1. М.: Изд. физ.-мат. литер., 1959. 755 с.
11. Михайлюк А.И., Ревенко В.Г., Натаров Н.Н. Повышение износо- и коррозионной стойкости меди методом электроискрового легирования // Физика и химия обработки материалов. 1993. № 1. С. 101–106.
12. Тодт Ф. Коррозия и защита от коррозии. Л., Химия, 1967. 709 с.
13. Гитлевич А.Е., Михайлюк А.И., Андреева Л.Н., Бабанова Ж.И. Формирование поверхностного слоя малорастворимых анодов катодной защиты от электрохимической коррозии / Conferința internațională “Tehnologii moderne. Calitate. Restructurare.” Vol.3, Chișinău, 1999, p.85–88.

Поступила 04.05.10

#### Summary

The results are presented of the studies of the use of graphite as an anode of electrospark alloying with the view of forming coatings at the surface of the pieces of steel, titanium and copper alloys with high wear resistance, antifricition, and resistance to corrosion.